УДК 620.17

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОДВЕРГНУТОГО ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

А.Е. Колгачев*, С.В. Панин, Ю.И. Почивалов, Н.А. Антипина

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
*Томский политехнический университет
E-mail: svp@ms.tsc.ru

Представлены результаты сравнительного исследования поведения при трении и износе образцов титанового сплава ВТ6 с наноструктурированным поверхностным слоем и последующей химико-термической обработкой. Показано, что подобная комплексная обработка позволяет увеличить микротвердость приповерхностного слоя с 3800 до 4800...5600 МПа, а также существенно повысить износостойкость. Полученный результат связывается с формированием поверхностных упрочненных слоев с повышенной микротвердостью и толщиной 50...150 мкм, имеющих профиль границы раздела «упрочненный слой – матрица», отличный от плоского.

Введение

В последнее время было показано, что наноструктурирование поверхностного слоя металлических материалов может обеспечить повышение прочностных характеристик при одновременном увеличении их пластичности [1]. Подобное модифицирование сопровождается созданием так называемого барьерного подслоя, который представляет собой материал с полосовой дислокационной субструктурой, препятствующей проникновению дефектов с поверхности в объем нагружаемого материала.

Одним из методов создания наноструктурного состояния в поверхностном слое и обеспечения градиентного изменения характеристик прочности по глубине обработанного материала [1] является ультразвуковая обработка (УЗО) поверхности. В работах А.В. Панина [2] и соавторов было показано, что характерной особенностью структуры поверхностного слоя холоднокатаного титана, подвергнутого УЗО, является наличие полосовой дислокационной субструктуры в виде параллельных дислокационных субграниц. Расстояние между ними составляет 0,2...0,5 мкм. Материал между микрополосами фрагментирован на субзерна неравноосной формы, вытянутые в направлении микрополос. При статическом нагружении (растяжении) образцов, подвергнутых подобному виду поверхностного упрочнения наблюдалось повышение как пластичности, так и предела прочности.

Однако УЗО без последующей химико-термической обработки не позволяет существенно повысить износостойкость, что весьма актуально в приложении к титановым сплавам.

В большинстве случаев в результате химико-термической обработки на поверхности материала формируется высокопрочный слой, имеющий плоский профиль границы раздела «покрытие-подложка». В наших предыдущих работах было показано, что более эффективным, с точки зрения снижения риска локализации деформации, является формирование неплоской границы раздела. В ряде случаев это обеспечивало повышение предела прочности при одновременном повышении пластичности поверхностно-упрочненного образца. Актуальность создания неплоской границы раздела между упрочненным поверхностным слоем и основой активно обсуждается в литературе [3, 4]. Показано, что неплоский профиль границы раздела позволяет диспергировать мощные концентраторы напряжений макромасштабного уровня за счет возникновения большого количества стохастически распределенных мезоконцентраторов напряжений меньшей мощности либо за счет образования неупорядоченной сетки микротрещин в покрытии [3].

В настоящей работе ставилась задача отработки технологического режима поверхностного упрочнения образцов титанового сплава ВТ6, основанного на комплексной механо-химико-термической обработке. Предполагалось, что в результате ее проведения удастся сформировать упрочненный поверхностный слой с неплоской границей раздела и большей толщиной (по сравнению с образцами, подвергнутыми химико-термической обработке без предварительного наноструктурирования поверхностного слоя). Поскольку одним из применений титанового сплава является изготовление лопаток паровых турбин, основным видом деградации которых является кавитационный – капельной фракцией, исследовали поведение образцов титанового сплава ВТ6 после комплексной обработки в условиях трения и износа.

Эксперимент

Испытания проводились на образцах титанового сплава ВТ6 в форме параллелепипеда 7×7×10 мм^3 по схеме "вал – колодка" в условиях граничной смазки на машине трения СМТ-1. В качестве смазки использовали индустриальное масло И-20. Образцы для исследований были разделены на две партии: в первой в приповерхностных слоях образцов создавали наноструктурное состояние, а во второй нет. Для последующей обработки поверхности были использованы 3 режима химико-термиче-

ской обработки и один режим ионно-плазменного поверхностного упрочнения. Поскольку в ближайшее время предполагается патентование данных методов, мы опустим их подробное описание. Обработка по режимам № 1 и № 2 различалась временем выдержки и проводилась при более низкой температуре. Режим № 3 отличается от предыдущих как меньшей продолжительностью обработки, так и более высокой температурой.

Контртело диаметром 62 мм изготавливали из стали ШХ-15. Испытания на трение проводили при начальной нагрузке на образец 25,8 Н и скорости вращения вала 150 об/мин. Продолжительность нагружения, как правило, составляла 70 мин. Интенсивность изнашивания оценивали путем измерения ширины дорожки трения по оптическим изображениям, записывавшимся с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Stemi 2000-C. Характер модификации поверхностного слоя при различных режимах поверхностного упрочнения оценивали путем измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на пирамидку Виккерса 100 г, а также путем травления. Оценка толщины унесенного слоя δ_y проводилось по монтажам оптических изображений, снятым на поверхности трения, путем пересчета ее величины через измеренное значение ширины дорожки трения по формуле [3]:

$$\delta_y = R - \sqrt{R^2 - l^2/4}, \qquad (1)$$

где R – радиус вала, l – ширина дорожки трения на образце.

Результаты и обсуждение

1) Образцы сплава ВТ6 в исходном состоянии

В течение первых пяти минут испытаний на рабочей части образцов сплава ВТ6 в исходном состоянии сформировалась дорожка трения шириной ≈3000 мкм (рис. 1, *кривая* 1). Коэффициент трения $f_{тр}$ за это время снизился от значения ≈0,4 до 0,1. Дальнейшее нагружение не показало существенной скорости роста ширины дорожки трения. За полное время испытаний 70 мин ширина дорожки трения возросла до 4500 мкм (рис. 1, *кривая* 1; рис. 2, *а*). Расчет толщины унесенного слоя, проведенный согласно выражению (1), показал, что за первые 5 мин работы была унесена толщина слоя, равная δ_y≈36 мкм, в то время как на момент окончания испытаний его величина составила δ_y≈81,8 мкм. При этом на стадии установившегося изнашивания изменений значения $f_{тр}$ не изменялось: $f_{тр}$≈0,1.

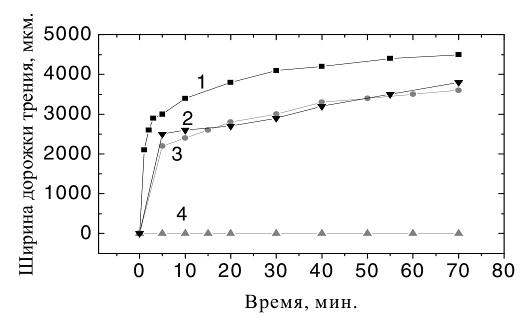


Рис. 1. *Зависимость ширины дорожки трения от времени нагружения образцов титанового сплава ВТ6: 1) в исходном состоянии; 2) с наноструктурированным приповерхностным слоем; 3) после химико-термической обработки по режиму № 1 без предварительного наноструктурирования и 4) с таковым*

2) Образцы сплава ВТ6 с наноструктурированным поверхностным слоем

При испытаниях образцов с предварительно наноструктурированным поверхностным слоем за первые 5 мин на рабочей поверхности сформировалась дорожка трения шириной 2500 мкм (что соответствует толщине унесенного слоя δ_y≈25,2 мкм). Дальнейшее нагружение не привело к существенному увеличению ширины дорожки трения: за 70 мин работы ширина дорожки трения возросла до 3800 мкм, при этом толщина унесенного слоя увеличилась до δ_y≈58,3 мкм (рис. 1, *кривая* 2; рис. 2, *б*). Изменение значения $f_{тр}$ имеет следующую зависимость: за первые 5 мин работы его значение падает от 0,12 до 0,06 (и таковым остаётся до конца испытаний).

3) Химико-термическая обработка по режиму № 1

После испытаний в течение первых 5 мин на рабочей поверхности образцов, обработанных по данному режиму, формировалась дорожка трения шириной ≈2200 мкм, что соответствует толщине унесенного слоя δ_y≈19,5 мкм. При дальнейшем нагру-

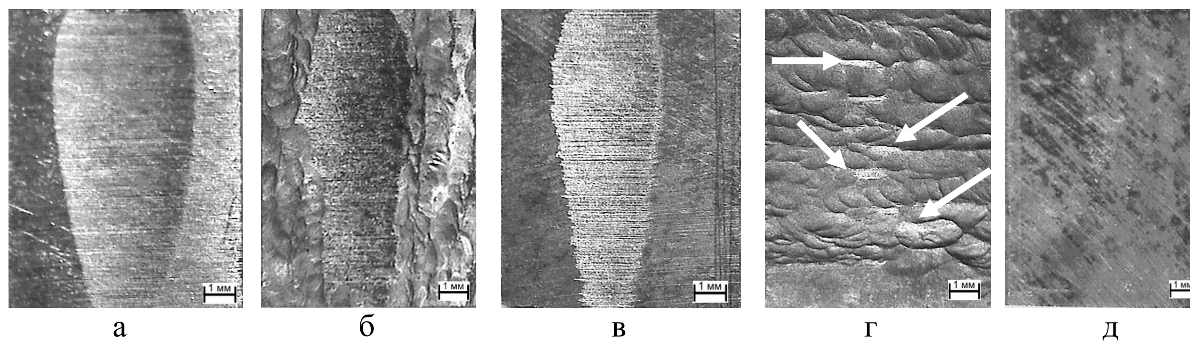


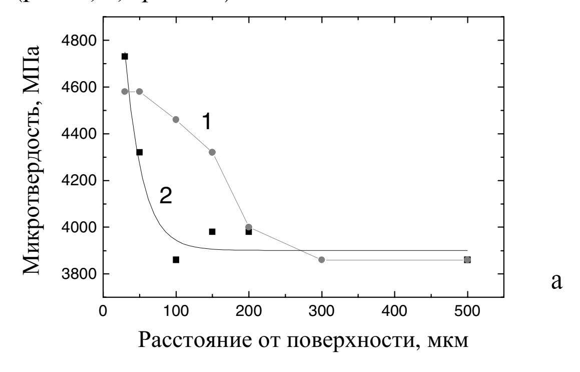
Рис. 2. *Изображения поверхностей трения образцов титанового сплава ВТ6: а) в исходном состоянии; после: б) наноструктурирования поверхностного слоя; в) химикотермической обработки № 1; г) химико-термической обработки № 1 с предшествующим наноструктурированием поверхности; д) химико-термической обработки № 2. Время нагружения 70 мин*

жении интенсивность изнашивания образцов, подвергнутых только наноструктурированию приповерхностных слоев и обработке по рассматриваемому режиму, была подобна (рис. 1, *кривая* 3, рис. 2, *в*). За 70 мин испытаний ширина дорожки трения возросла до 3600 мкм (что соответствует толщине унесенного слоя $\delta_y \approx 52,3$ мкм). За первые 10 мин работы значение $f_{тр}$ колеблется от 0,06 до 0,1. В течение следующих 5 мин нагружения $f_{тр}$ выходит на значение 0,06 и в дальнейшем остается таковым до конца испытания.

Различие ширины дорожки трения образцов, обработанных по режимам № 1–3, становится более очевидной при сопоставлении оптических изображений их поверхностей трения (рис. 2). В то же время, несмотря на некоторое различие в величине интенсивности изнашивания, характер последнего для всех вышеперечисленных образцов является подобным, что свидетельствует о подобии процессов и механизмов износа, реализующихся при их трибонагружении.

4) Химико-термическая обработка по режиму № 1 образцов с предварительно наноструктурированным поверхностных слоев

Обработка образцов в данном режиме приводила к увеличению микротвердости в приповерхностном слое примерно на ≈800 МПа (рис. 3, *а*). Однако, предварительное наноструктурирование поверхностного слоя позволяло увеличивать толщину слоя с максимальной микротвердостью до 50 мкм (рис. 3, *а*, *кривая* 1).



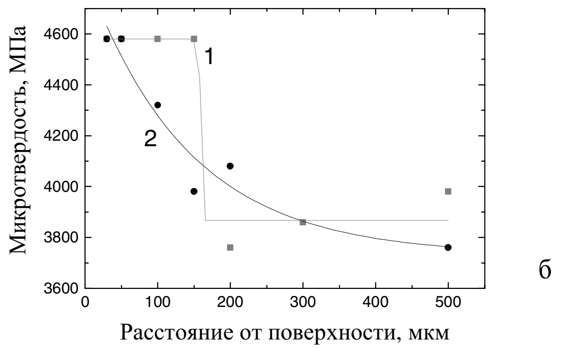


Рис. 3. *Графики распределения микротвёрдости по глубине образцов, подвергавшихся химико-термической обработке: а) № 1; б) № 2; 1) подвергнутых наноструктурированию поверхностных слоев; 2) без предварительного поверхностного наноструктурирования*

За время испытаний (70 мин) на поверхности образца не было обнаружено следов износа, проявляющихся в виде образования дорожки трения (рис. 1, *кривая* 4). Заметны только небольшие "потёртости" (на рис. 2, *г*, обозначены стрелками). Значения коэффициента $f_{тр}$ изменяется практически подобно всем вышерассмотренным образцам: в начале испытания его значение равно 0,18 и за 15 мин трения выходит на значение 0,1, которое остается до конца испытания.

5) Химико-термическая обработка по режиму № 2

Обработка образцов сплава ВТ6 по данному режиму не приводит к повышению микротвердости на поверхности, однако возрастает глубина упрочненного слоя (что проявляется на глубине до 150 мкм – рис. 3, *б*, *кривая* 2). Следует отметить, что выдержка образцов ВТ6 при повышенной температуре не приводит к изменению зеренной структуры в объеме, однако формирование в приповерхностном слое высокопрочных дисперсных фаз позволяет модифицировать (упрочнить) поверхностный слой без потери прочностных свойств всего образца.

Предварительное наноструктурирование поверхностного слоя не приводит к увеличению микротвердости приповерхностного слоя после последующей химико-термической обработки: H_μ>4500 МПа. Однако наблюдается увеличение глубины приповерхностного слоя с максимальным (повышенным) значением микротвердости до ~150 мкм (рис. 3, *б*, *кривая* 1).

Проведенные испытания на трение показали, что износостойкость образцов сплава ВТ6, поверхностно упрочненных химико-термическим методом № 2, даже без предварительного наноструктурирования поверхности, повышается по сравнению со всеми вышеописанными режимами обработки: за время испытаний 70 мин на поверхности трения не удалось зафиксировать следов формирования дорожки трения – рис. 2, *д* (подобно тому, что наблюдалось для описанного выше образца, обработанного в режиме № 2 с предварительным поверхностным наноструктурированием – рис. 2, *г*). В то же время характер изменения значения коэффициента трения остается подобным для всех вышеописанных режимов обработки: значение $f_{тр}$ за первые 5 мин работы падает от 0,18 до 0,1 и в дальнейшем стабилизируется.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование предварительного наноструктурирования приповерхностных слоев и последующей химико-термической обработки поверхности позволяют в значительной степени увеличить износостойкость титанового сплава ВТ6 (по крайней мере, в использованном диапазоне нагрузок).

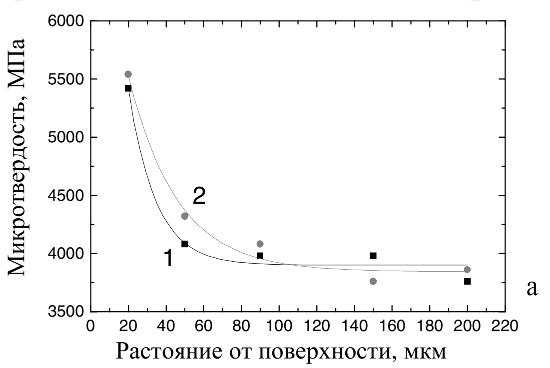
6) Химико-термическая обработка по режиму № 3

Следует, прежде всего, отметить, что использование подобного режима термообработки является нежелательным, поскольку используемая повы-

шенная температура не всегда может быть использована в технологических циклах термообработки. Однако обработка при повышенных температурах позволяет сформировать более прочные приповерхностные слои, что должно положительно сказаться на увеличении их износостойкости.

На рис. 4, *а*, показаны распределения микротвердости в приповерхностном слое образцов, обработанных в режиме № 3 без предварительного наноструктурирования поверхности (1) и с применением такового (2). Видно, что увеличение температуры приводит к повышению микротвердости до H_{μ}=5600 МПа, однако влияние наноструктурного состояния на повышение данного параметра практически не проявляется (рис. 4, *а*, *кривые* 1, 2). Данный факт, по всей видимости, связан с высокой температурой обработки, что, фактически, нивелирует предыдущее наноструктурирование (вследствие протекающей при этом рекристаллизации).

На рис. 5, *а*, показана зеренная структура образцов сплава ВТ6 в исходном состоянии. Видно, что зерна имеет вытянутую форму без преимущественной текстуры. После обработки по указанному режиму около поверхности формируется высокопрочный слой толщиной около 150 мкм (рис. 5, *б*).



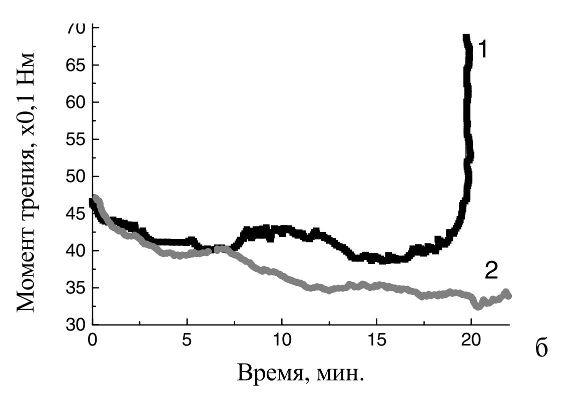
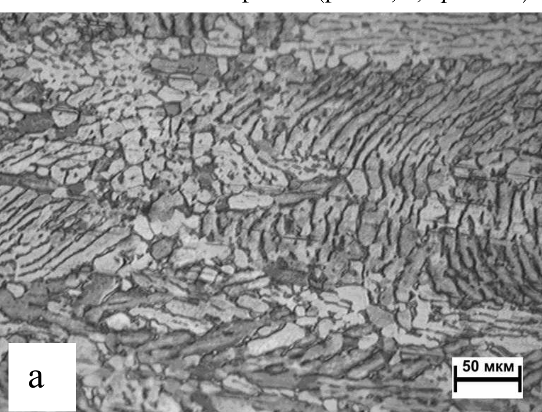


Рис. 4. *Графики: а) распределения микротвердости; б) зависимости момента трения от продолжительности испытаний образцов титанового сплава ВТ6 режим № 3 (1) и с наноструктурным состоянием поверхности, предшествовавшим химико-термической обработке (2); нагрузка 4000 Н*

Испытания на трение показали следующие результаты. Нагрузка, прикладывавшаяся к образцам, увеличивалась от 500 до 4000 Н. При испытании образцов без наноструктурированного поверхностного слоя, обработанных по режиму № 3, последовательное увеличение нагрузки приводило к снижению коэффициента трения. Величина последнего при *P*=4000 Н составила $f_{тр}$=0,16. При времени нагружения *t*≈20 мин происходил отрыв упрочненного поверхностного слоя, чему соответствует резкое увеличение момента трения (рис. 4, *б*, *кривая* 1).



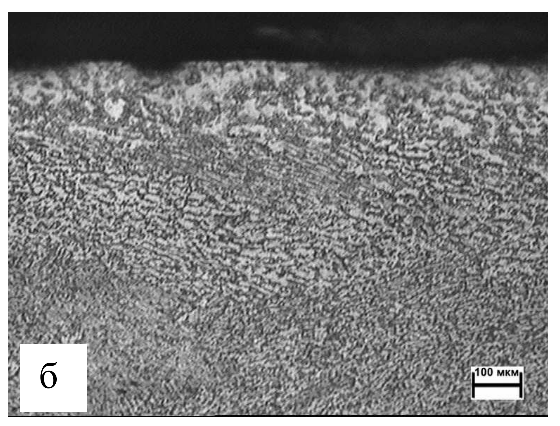


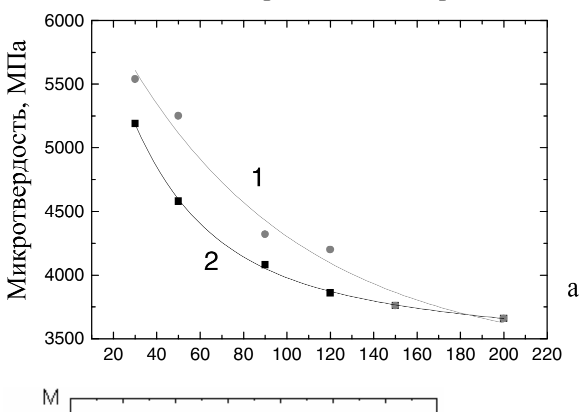
Рис. 5. *Микроструктура образцов сплава ВТ6: а) в исходном состоянии и б) после обработки по режиму № 3*

При испытании упрочненных образцов, подвергавшихся предварительному поверхностному наноструктурированию, при величине нагрузки 4000 Н не наблюдалось увеличение ширины дорожки трения, что сопровождалось постепенным снижением момента трения (рис. 4, *б*, *кривая* 2). При последующем повышении нагрузки до 5000 Н было выявлено, что время до отрыва модифицированного слоя составляет 37 мин. Среднее значение $f_{тр}$ при этом составляло 0,14.

По всей видимости, наблюдавшийся эффект увеличения износостойкости при примерно одинаковой микротвердости приповерхностного слоя связан с предварительным наноструктурированием приповерхностных слоев и последующим формированием зубчатой структуры между упрочненным поверхностным слоем и основой в процессе химико-термического воздействия. Исследованию данного вопроса будет посвящена наша следующая работа.

7) Ионно-плазменное поверхностное упрочнение и предшествующее наноструктурирование поверхностного слоя

На рис. 6, *а*, показаны кривые изменения микротвердости при удалении от поверхностно-упрочненного слоя упрочненных образцов, обработанных (1) и не подвергавшихся наноструктурированию поверхностного слоя (2). Видно, что предварительное наноструктурирование поверхностных слоев и последующая обработка по режиму № 4 увеличивают микротвердость на поверхности (до $H_\mu \approx 5450$ МПа, т.е. примерно на 2000 МПа выше по сравнению с материалом сердцевины – рис. 6, *кривая* 1). При отсутствии предварительной механической обработки с целью создания наноструктурного состояния в приповерхностных слоях микротвердость на поверхности была лишь немного ниже ($H_\mu \approx 5200$ МПа). В целом же, характер распределения микротвердости по поперечному сечению в образцах обоих типов является подобным (рис. 6, *кривая* 2), хотя толщина слоя с максимальной микротвердостью на поверхности предварительно механически обработанного образца выше.



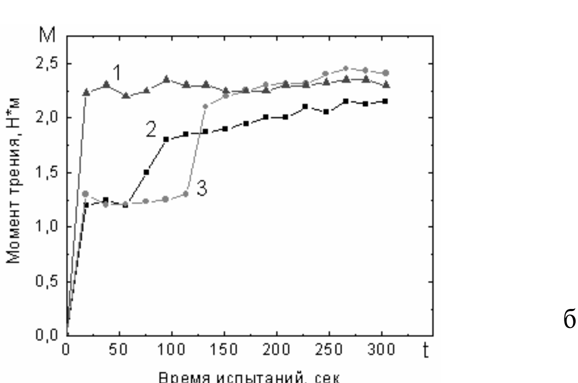


Рис. 6. *а) Распределение микротвердости по толщине образцов сплава ВТ6, упрочненных в режиме № 4 (2) и с предшествующим наноструктурированием (1); б) зависимость момента трения от продолжительности испытаний образцов титанового сплава ВТ6 без обработки поверхности (1), с химико-термической обработкой № 4 (2) и в условиях комбинированной обработки (3)*

Для исследования износостойкости образцов сплава ВТ6 в исходном состоянии и с упрочненным поверхностным слоем использовали нагрузку P=4000 Н. Следует отметить, что скорость вращения контртела при испытаниях покрытий данного типа была снижена и составляла 100 об/мин. При этом в образцах в исходном состоянии практически с самого начала нагружения момент трения составлял $M \approx 2,3$ Н·м. В случае химико-термически упрочненных образцов без предварительного наноструктурирования поверхностного слоя, существенное увеличение момента трения M (соответствовавшего срыву упрочненного слоя) наблюдалось при продолжительности испытаний ≈60 с, в то время как в образцах с комбинированной обработкой резкое увеличение M фиксировалось только после ≈120 с испытаний (рис. 6, *б*). По всей видимости, подобный эффект достигается именно за счет формирования неплоской границы раздела между упрочненным поверхностным слоем и матрицей вследствие предварительного наноструктурирования приповерхностных слоев материала.

Заключение

1. Экспериментально показано, что предварительное наноструктурирование поверхностного слоя и последующая химико-термическая обработка образцов сплава ВТ6 при небольших величинах нагрузки в условиях трибонагружения исключает формирование на поверхности трибоконтакта дорожки трения.
2. Предварительное наноструктурирование образцов сплава ВТ6 при комбинированной механо-химико-термической обработке позволяет значительно повысить износостойкость, при этом влияние первого эквивалентно увеличению времени химико-термической обработки.
3. Ионно-плазменное поверхностное упрочнение не позволяет существенно повысить износостойкость образцов сплава ВТ6, однако предварительное наноструктурирование увеличивает время эффективного сопротивления образца уносу упрочненного поверхностного слоя, что может быть связано с формированием неплоской границы раздела «упрочненный слой-подложка».

Авторы выражают искреннюю благодарность академику В.Е. Панину за постановку задачи исследований и обсуждение результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН «Накопление поврежденности, разрушение, изнашивание и структурные изменения материалов при интенсивных механических, температурных и радиационных воздействиях» (руководитель академик И.Г. Горячева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.
2. Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И. и др. Особенности локализации деформации и механического поведения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 4. – С. 73–84.
3. Панин С.В., Коваль А.В., Трусова Г.В., Почивалов Ю.И., Сизова О.В. Влияние геометрии и структуры границы раздела на характер развития пластической деформации на мезомасштабном уровне борированных образцов конструкционных сталей // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С. 99–115.
4. Панин С.В., Клименов В.А., Сейфуллина М.П. и др. Влияние обработки ультразвуком в процессе оплавления газотермических покрытий на характер деформирования и разрушения композиций с напыленными покрытиями при трехточечном изгибе // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 2. – С. 105–115.
5. Кукареко В.А., Белый А.В., Панин С.В., Шаркеев Ю.П. и др. Влияние высокоинтенсивной имплантации ионов азота на структуру и поведение стали 40Х в условиях трения и износа // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 71–80.

УДК 539.121.8.04:621.9.047.7